

## **Valoración de la precisión en MDEs generados mediante correlación automática**

### **Resumen**

En este trabajo se muestra una experiencia en la generación de Modelos Digitales de Elevaciones (MDEs) a partir de algoritmos de correlación automática propios de una Estación de Fotogrametría Digital (EFD), así como una evaluación sobre la precisión obtenida en función de los datos disponibles y de la metodología empleada.

Este estudio se aplica a un espacio singular denominado cerro “Calderico” en el que se ubican los famosos molinos de viento de Don Quijote en Consuegra (Toledo, España), donde se diferencian tres zonas, caracterizadas principalmente por su distinta pendiente.

Una vez creados los diferentes MDEs para los ámbitos descritos se efectúa un análisis estadístico que nos servirá para hacer una valoración cualitativa tanto de los modelos como de las ortoimágenes que se obtengan.

Los resultados que se aportan indican mayor disparidad en la precisión de los puntos homólogos identificados en cada MDE para las zonas de más desnivel y menor en las zonas con pendiente más suave. Es interesante observar la buena calidad de los puntos controlados mediante GPS diferencial.

**Palabras clave:** Fotogrametría Digital, MDE, exactitud, estereoscópica, correlación, variabilidad de pendiente, cerro, espacio singular.

## **Valuation of the precision in DEMs generated by means of automatic correlation**

### **Abstract**

In this work one is a experience in the generation of DEM (Digital Elevation Model) from own algorithms of automatic correlation of a Workstation of Digital Photogrammetry (DPW), as well as an evaluation on the precision obtained based on the data available and from the used methodology.

This study is applied to a singular space denominated hill “Calderico” in that the famous wind mills are located of Don Quixote in Consuegra (Toledo, Spain), where are different three zones, characterized mainly by its different slope.

Once created the different DEM for the described scopes a statistical analysis becomes that will serve us to as much make a valuation qualitative of the models as orthoimages which they are obtained.

The results that are contributed indicate greater disparity in the precision of the homologous points identified in each DEM for the zones of more unevenness and minor in the zones with smoother slope. He is interesting to observe the good quality of the points controlled by means of GPS differential.

**Keywords:** Digital photogrammetry, DEM, Accuracy, Stereoscopic, Correlation, Slope Variability, Hill, Singular Space.

## **1. Introducción**

La American Society of Photogrammetry (ASP) define la Fotogrametría como el arte, la ciencia y la tecnología orientados a obtener información relevante de los objetos físicos de la corteza terrestre y de su entorno, a través de procesos de medición, registro e interpretación de imágenes fotográficas, Wolf (1983).

Una de las definiciones más conocidas de esta disciplina es “Photogrammetry is the art, science, and technology of obtaining reliable information about physical objects and the environment through process of recording, measuring, and interpreting photographic images and patterns of electromagnetic radiant energy and other phenomena”, Slama (1980).

Una de las principales aplicaciones de la Fotogrametría desde su aparición como ciencia en 1840, ha sido el levantamiento cartográfico de la superficie terrestre y la representación de ésta en mapas planimétricos y/o altimétricos.

La evolución de la fotogrametría es inseparable de la propia transformación instrumental, ha ido pasando por los aparatos óptico-mecánico de tipo analógico, luego por los analíticos, para llegar de lleno al mundo digital, donde las estaciones fotogramétricas digitales se van imponiendo y desplazando a los anteriores, Molina (1999).

Las ventajas en los procesos de ésta evolución han sido la sustitución de los componentes ópticos mecánicos y electrónica por software y la posibilidad de la utilización de procesos automáticos en la identificación de puntos homólogos en imágenes consecutivas que nos llevaría a la generación de modelos digitales de terreno mediante la aplicación de técnicas de correlación de imágenes, Ackermann (1996).

En los últimos años la utilización de la cartografía digital como documento básico en la ordenación y planificación territorial conlleva tener actualizadas las bases de datos geográficas y poder manejar otras aplicaciones digitales que nos ayuden a la hora de dar una respuesta rápida y eficaz. En este ámbito, la generación y la aplicación de los MDEs nos sirve para disponer de una representación tridimensional de la superficie donde se va a intervenir. Por tanto la

fotogrametría digital en general presenta un conjunto de ventajas frente a otros sistemas, (Heipke, 1999; Saleh, 1996).

En el ámbito de la fotogrametría se utiliza el término “*Matching*” para expresar la correlación entre diversos conjuntos de datos, así puede estudiarse en la orientación interna, orientación relativa, aerotriangulación, orientación absoluta, generación de modelos digitales de elevaciones, etc.

Este trabajo está enmarcado en un Proyecto de Investigación del Plan Nacional I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) que subvenciona el Ministerio de Cultura a las universidades españolas. Concretamente el Proyecto del que hablamos lo realizan tres investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid y uno de la Universidad de Jaén y su título es: “Estudio histórico-tecnológico de los Molinos de Viento de la Mancha, de los siglos XVI y XVII”. Dentro del Proyecto interesa estudiar fotogramétricamente uno de los espacios singulares en el que se ubican estos molinos de viento. El espacio que nos ocupa en este artículo es el “Cerro Calderito” perteneciente al término municipal de Consuegra, en la provincia de Toledo (Castilla-La Mancha – España). Dicho espacio se pretende estudiar y representar por los medios antes descritos. Por otra parte se diferencian dos entornos de trabajo, el efectuado sobre el propio espacio que condiciona el proceso global y el llevado a cabo en gabinete que en buena medida debe de adaptarse a los materiales y datos disponibles.

## **2. Background**

Un MDE es definido como “una representación digital de la variación continua del terreno sobre el espacio”, Burrough and McDonnell (1998). Desde mediados de los años 90 la utilización del sistema Lidar (Light Detection And Ranking) ha ofrecido una alta precisión y una rápida toma de datos a un bajo coste debido a que no depende del tiempo, estación u hora en el día para la toma de datos, Fowler (2001). Los MDEs son los datos bases de los que parten los distintos análisis de SIG, a la hora de utilizarlos como modelo de terreno, visualización de mapas o modelos hidrológicos, de erosión, etc.

Un proceso de explotación automática del modelo estereoscópico, es la obtención de un MDE. Se basa en la identificación automática de puntos homólogos en ambas fotos, y una vez conocidos los parámetros de orientación, calcular digitalmente la coordenada "Z" en el terreno.

Se debe definir como estrategia la precisión altimétrica necesaria, marco de la cuadrícula, escala de fotografía, método de captura y de control de calidad. Hay estudios que proponen métodos para mejorar los aspectos relativos a las elevaciones en procesos fotogramétricos automatizados, Felicísimo et al., (2004).

Para la obtención del MDE es conveniente capturar manualmente por el método de restitución las líneas de ruptura y estructura como una fase previa, ya que ayuda al proceso automático de identificación de imágenes.

A continuación se procede al proceso automático, donde mediante técnicas ABM (Area Based Matching ) o FBM (Feature Based Matching ) se selecciona un detalle en la imagen original y éste se identifica en la foto homóloga, una vez obtenido las coordenadas en el sistema foto. Mediante las ecuaciones de colinealidad, interceptamos los rayos y finalmente se obtiene la Z en terreno.

**Tabla 1.** Métodos de identificación de imágenes

Método identificación Matching method	Éxito de identificación Similarity mesure	Entidades patrón Matching entities
Area Based Matching ABM	Correlación LSM (mínimos cuadrados)	Ventana de píxeles/ escala de grises
Feature Based Matching FBM	Cost funtion	Entidades:Puntos/ej es/áreas
Symbolic Based Matching	Cost funtion	Propiedades topológicas

Estos análisis requieren por lo general una alta precisión del MDE. La precisión del MDE está representada por la “resolución espacial” y por la “precisión en altura”. En este artículo vamos a analizar la calidad de la “precisión” en los distintos ámbitos de un espacio singular.

Hay que relacionar calidad del MDE con la optimización del proyecto a realizar, teniendo en cuenta que mediante fotogrametría digital, o por medio de imágenes de satélites o empleando Lidar se pueden obtener precisiones próximas a 1 cm e incluso inferiores, por lo tanto debemos realizar un estudio previo de la cartografía que queremos obtener y de la calidad del MDE que nos servirá para el proyecto donde tendremos en cuenta la resolución espacial, la toma de datos así como el tiempo de elaboración empleado.

Ejemplos sobre medidas de exactitud en DEM se pueden encontrar en Li (1993). Existen estudios sobre la elaboración de métodos que estimen la precisión en cada punto del DEM, Kraus, (2006).

La ortofotografía es el producto final de la fotogrametría digital, en su elaboración se deben llevar una pautas necesarias, Krupnik, (2003), en donde del MDEs se extrae la elevación de cada punto. Tanto la ortofotografía como la definición de la superficie de la tierra mediante MDEs es una necesidad para la planificación, gestión y ordenación del territorio en campos tales como la ingeniería civil, agronómica, medio ambiente, arqueología, protección civil, telecomunicaciones, Kaufmann und Sulzer (1997); Konecny (2000).

Existen estudios anteriores donde se analiza la calidad del MDE comparando un modelo creado por curvas de nivel (mapa topográfico) con otro modelo derivado de imágenes digitales y método de correlación, Hohle (2005). Toutin (2005) en un proyecto que analiza los recursos naturales de Canadá evalúa la precisión de un MDE creado a partir de imágenes digitales en estéreo de Ikonos frente a un modelo de datos de elevación Lidar, en distintos tipos de terreno (monte, urbano, lagos, zona llana, etc.).

Basándonos en análisis del tipo antes descrito, el presente trabajo estudia un espacio singular caracterizado por la presencia de los famosos molinos de viento de Don Quijote –PRC- (Patrimonio Rural Construido), donde confluyen tres ámbitos de terreno diferentes: zona llana, zona urbana y zona de cerro, donde comprobaremos la calidad del MDE en cada uno de ellos.

El término correlación consiste en el establecimiento automático de alguna relación entre la información digital de dos grupos de datos. La correlación explica el proceso de identificación automática de los puntos homólogos en imágenes digitales, Ackermann (1984). Existen estudios que relacionan el error en el proceso de correlación automática con ciertas áreas, Heipke (1995), Gooch (2001), superficies muy monótonas con una textura muy similar, zonas con un cambio brusco de pendiente, según la escala de las imágenes.

A continuación se describen dos métodos típicos de cálculo computacional directos, y debido a que cada método tiene sus imperfecciones, se utilizan de forma simultánea dos o más métodos con el propósito de comparar resultados y reducir errores en la definición de puntos homólogos.

- Método de la función de covarianza

La relación de correlación entre imágenes se puede expresar mediante las ecuaciones de covarianza.

Se calculan los valores de la función de covarianza de dos grupos de datos, y la covarianza mayor obtenida se toma como la posición de la correlación buscada.

El valor  $x_i$  representa el valor digital en la posición  $i$  en el primer grupo de datos, e  $y_i$  al segundo grupo de datos. Las medias de ambos grupos serían:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

La covarianza  $\sigma_{xy}$  de los dos grupos de datos sería:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i y_i - \bar{x} \bar{y}) \quad (3)$$

- Método del coeficiente de correlación

La relación de correlación entre dos grupos de datos puede representarse por medio de un coeficiente  $\rho$  o por medio de su cuadrado  $c^2$ .

$$c = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_{xx} \sigma_{yy}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \right)}} \quad (4)$$

El valor del coeficiente de correlación se encuentra entre +1 y -1. El valor 1 indica la correlación más fuerte entre dos objetos, y el valor 0 que no hay correspondencia entre ellos.



### 3. Localización y área de estudio

La localidad de Consuegra se encuentra localizada en la provincia de Toledo (Castilla-La Mancha, España), la hoja del Mapa Topográfico Nacional es la nº 712 – Los Carrascales.

La zona de estudio se localiza en el cerro Calderico (figura 1), al sur de la localidad de Consuegra ( $39^{\circ}26'$  –  $39^{\circ}27'$  latitud norte y  $3^{\circ}35'$  –  $3^{\circ}37'$  longitud oeste) y comprende una superficie de unas 504 Has. (10.35 % a suelo urbano y el 89.65 % a suelo rural). La altitud oscila entre 700 y 830 m. En este cerro se encuentran 12 molinos de viento del siglo XVI-XVII (figura 2).



**Fig. 1.** Mapa de localización y zona de estudio



**Fig. 2.** Molinos de viento sobre el cerro ‘Calderico’ en Consuegra (Toledo, Spain)

#### **4. Metodología**

La metodología llevada a cabo para obtener los MDEs tanto de los puntos obtenidos por correlación automática como el modelo de los puntos restituidos manualmente ha sido la siguiente:

- Vuelo fotogramétrico. Modelo procedente de un vuelo fotogramétrico realizado en 2005. A partir de la delimitación de la zona de estudio sobre la cartografía digital, se realizó un vuelo fotogramétrico a escala 1/8.000 con un recubrimiento longitudinal del 60 %, usando una cámara RMK TOP 15 con un objetivo gran angular de 153.761 mm. de focal, obteniendo las fotos aéreas en película de alta definición aerocolor 2444 de la casa Kodak con una emulsión capaz de registrar detalles perceptibles comprendidos entre 2 y 3 micras.

- Escaneado de fotos aéreas. Utilizando un escáner de alta precisión (Epson Expresión 1640 XL) se escanearon los negativos de las fotos que componen el proyecto, con las características siguientes: resolución de 1200 ppp (21 micras), color 24 bit, tamaño de imagen ~ 11000 x 11000 pixel (fichero .TIF de 350 MB).

#### 4.1. *Recopilación de datos*

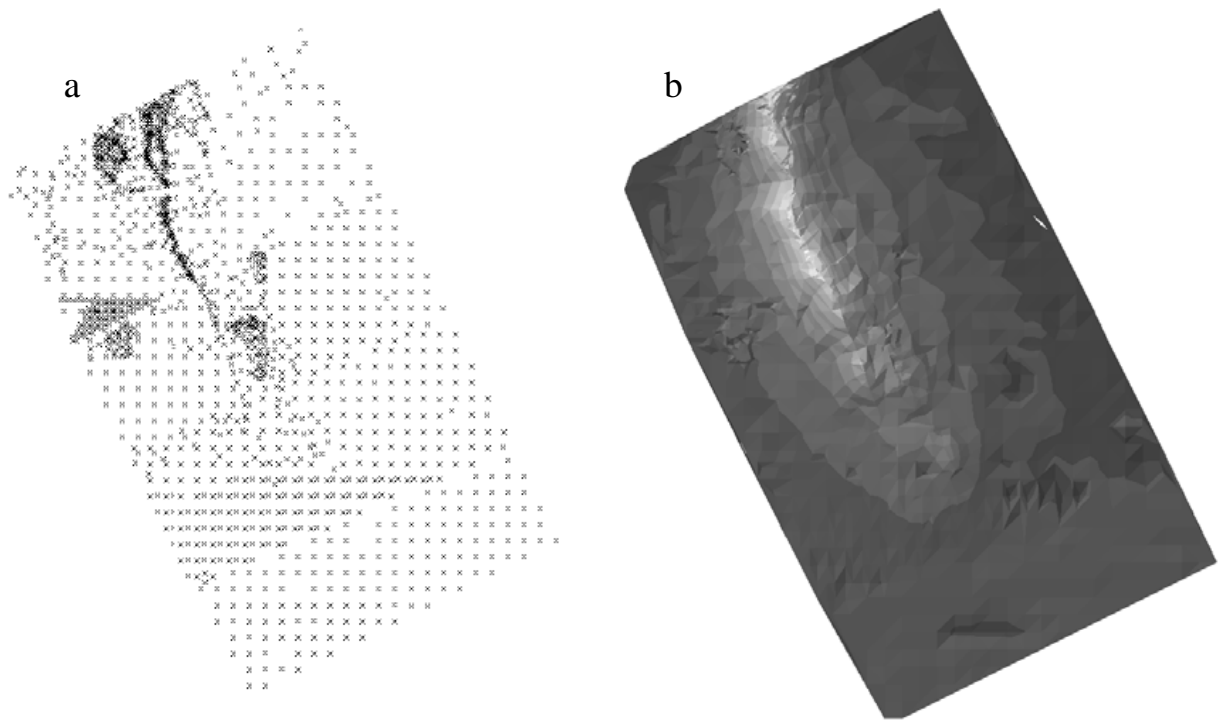
Basándonos en estudios de comparación de DEMs, Büyüksalih, (2004), la zonificación del área de estudio se ha realizado de la siguiente manera: un ámbito urbano (AU) siendo su límite el final de las edificaciones urbanas, un ámbito llano (ALL) que comprendería las zonas desde 0 – 9° de pendiente y un ámbito de cerro (AC) que comprendería los terrenos con más de 9 ° de pendiente.

Para el estudio del dato fuente se han utilizado cuatro fuentes de información:

FUENTE 1 (MODELO 1). Modelo de referencia. Un MDE base a partir de una restitución manual de 1564 puntos distribuidos por la zona de estudio. Utilizando un modelo estereoscópico, se han restituido los puntos en cada par epipolar, obteniéndose 1564 puntos en los 4 pares epipolares seleccionados que cubren la zona de estudio (figura 3a).

El proceso fotogramétrico se ha efectuado en una estación fotogramétrica digital PhoTopoL de alta precisión, llevándose a cabo la orientación tanto interna como externa, ésta última mediante un ajuste simultáneo de haces utilizando como información del terreno una serie de puntos de apoyo. El software de la estación fotogramétrica digital ha sido desarrollado por TopoL Software Ltd. Praga, Republica Checa.

El MDE se realizó a partir de los puntos obtenidos por restitución manual, dando como resultado la superficie que muestra la figura 3b.

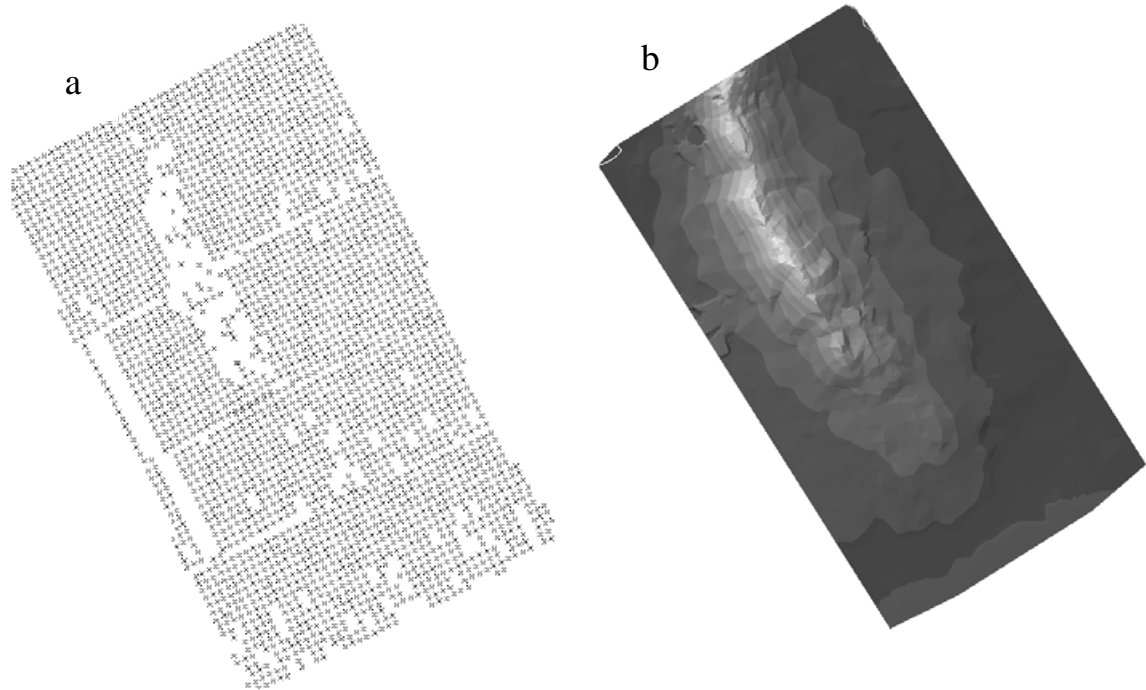


**Fig. 3:** Puntos obtenidos por restitución manual y MDE

FUENTE 2 (MODELO 2). MDE elaborado mediante una operación de correlación automática. El software seleccionado (TopoL Software) genera un bloque de puntos con sus alturas verdaderas sobre el terreno, en todos los pares epipolares seleccionados. La generación está basada en la comparación de zonas de las dos fotos usando un algoritmo iterativo de cálculo de correlaciones que es capaz de encontrar puntos similares en las fotos izquierda y derecha del par epipolar.

Se ha establecido una rejilla de 40 x 40 m., obteniendo 2747 puntos por correlación automática en los 4 pares epipolares seleccionados que cubren la zona de estudio. Como filtro de calidad se ha utilizado que el coeficiente de correlación ( $\rho$ ) sea superior a 0.35 y que la mínima distancia entre rayos sea inferior a 1.0 (figura 4a).

El MDE se realizó a partir de los puntos obtenidos por correlación automática, dando como resultado la superficie que muestra la figura 4b.



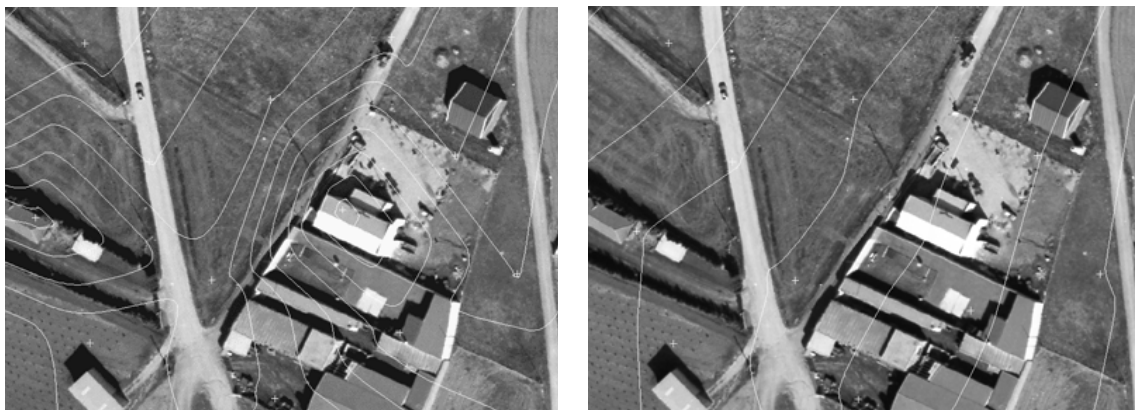
**Fig. 4:** Puntos obtenidos por correlación automática y MDE

Posteriormente se supervisó mediante visión estereoscópica, uno a uno todos los puntos que había generado el algoritmo de correlación automática. El sistema localizó correctamente el 71.6 % de los puntos, siendo incorrecto en el 2.9 % y con vacío de puntos en el 13.5 %. En la tabla siguiente (tabla 2) se muestra los resultados obtenidos del proceso de correlación automática:

**Tabla 2:** Resultados del proceso de correlación automática

Par epipolar	Puntos	Correcto	%	Incorrecto	%	No Correlado	%	Suelo urbano	%
432433	890	463	52.0	12	1.3	103	11.6	312	35.1
433434	650	491	75.5	41	6.3	103	15.9	15	2.3
434435	553	454	82.1	14	2.5	83	15.0	2	0.4
435436	654	559	85.5	13	2.0	82	12.5	0	0.0
Total	2747	1967	71.6	80	2.9	371	13.5	329	12.0

FUENTE 3 (MODELO 3). Modelo por correlación automática supervisado y rectificado mediante líneas de rotura, revisión, curvas de nivel, etc... Al igual que en otros estudios, Büyüksalih, (2004), en la revisión se han detectado errores del MDE al incluir las alturas de superficies naturales o humanas (árboles, casas, etc); errores producidos en la correlación automática y definido como “blunder” (Maas, 1996) que puede ser debido por la pobre estabilidad geométrica de un scanner no calibrado o porque el proceso automático de correlación no ha podido corregir las ambigüedades en ese punto (figura 5). Existen estudios sobre la aplicación de filtros o procesos automáticos para detectar errores tipo blunder y posteriormente eliminarlos, Hohle (2005), (Sithole and Vosselman, 2004). Estudios actuales sobre calidad de datos de elevación obtenidos mediante Lidar aconsejan el uso de esta técnica basada en tecnología láser para generación de puntos en ámbitos urbanos, Shan (2005).

**Fig. 5.** Punto por correlación automática y rectificado

FUENTE 4 (MODELO 4). DEM a partir del Mapa Topográfico Nacional de España, escala 1:25000. Hoja nº 712 – II Madridejos, que contiene curvas cada 10 m., puntos de cota y las líneas de rotura. Se trata de una cartografía de amplio uso ya que cubre todo el conjunto del territorio español y de fácil adquisición.

Además de la evaluación de la calidad de los cuatro modelos generados se realizó otra experiencia mediante técnicas GPS para validar y contrastar la calidad de los DEMs. Utilizando como base el vértice geodésico de la ROI “La Cuesta” (figura 6), hoja 712 del MTN, localizado en el mismo cerro Calderico (Consuegra) se han observado 10 puntos de control mediante técnicas GPS, llegando a obtener precisiones centimétricas una vez calculadas sus coordenadas, para poder analizar la precisión de la coordenada z en los diferentes DEMs. Dichos puntos están bien distribuidos por la zona de estudio y primeramente se han restituidos en el modelo estereoscópico correspondiente. Los cálculos se realizaron en el sistema de referencia WGS-84 para su posterior transformación al Sistema de Referencia Geodésico Local (UTM ED-50).



**Fig. 6.** Vértice geodésico de la ROI “La Cuesta” (828.6 m.)

## 5. Análisis de los resultados

A partir de los puntos restituidos manualmente se creó una base de datos (tabla 3) con la siguiente estructura: número de punto, coordenada x (x), coordenada y (y) y coordenada z de los distintos modelos a evaluar (z1, z2, z3, z4). Añadimos a dicha estructura un nuevo campo (clase) para indicar el ámbito a que pertenece cada punto.

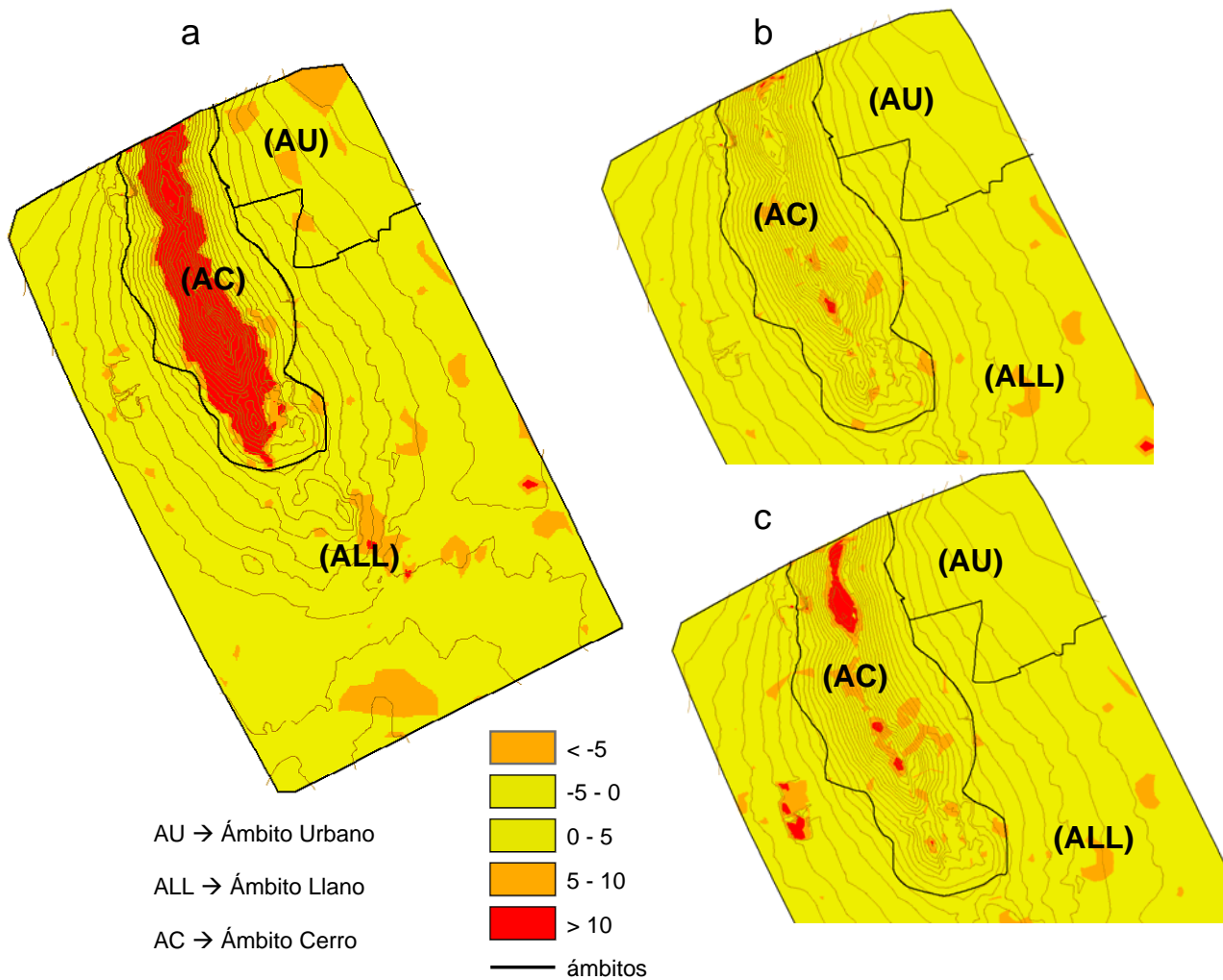
**Tabla 3:** Estructura de la base de datos generada

punto	x	y	z1	z2	z3	z4	clase
1	447309.621	4366893.221	721.872	723.087	723.042	720.469	llano
2	448703.412	4367210.714	714.023	714.989	714.743	713.995	urbano
3	447456.055	4366440.704	724.004	724.088	723.834	721.731	llano
4	448928.208	4366740.852	715.415	715.595	715.696	715.404	llano
5	449246.571	4366186.270	713.899	714.008	714.017	716.362	llano
6	447815.631	4367688.072	790.564	718.543	787.921	788.750	cerro
7	447738.346	4367684.271	802.366	734.181	791.056	790.000	cerro
8	447898.889	4367762.813	762.095	762.350	762.350	759.167	cerro
9	447978.845	4367762.776	737.344	739.126	737.986	737.917	cerro
10	447260.533	4367289.196	720.257	717.772	717.772	716.544	llano
11	447340.808	4367298.473	721.455	720.243	720.710	719.134	llano
12	447725.816	4366710.725	738.063	744.884	745.483	744.375	cerro
13	447339.368	4367362.278	722.856	720.137	720.137	718.482	llano
14	447259.423	4367362.575	713.398	716.015	716.152	715.625	llano
15	447179.368	4367362.278	711.368	712.595	712.775	712.824	urbano
...							
1564	448028.221	4365328.757	720.844	724.233	724.233	721.105	llano

En este artículo al igual que algunos estudios sobre calidad de los MDEs, vamos a relacionar características topográficas (pendiente y orientación) combinada con las diferencias verticales entre los distintos MDE, Racoviteanu, (2007); Hsing-Chung, (2004).

Utilizando para la interpretación de los datos obtenidos el software ArcGIS 9.1 y la extensión 3D Analyst se elaboraron los siguientes mapas de diferencias de alturas entre los distintos MDEs (figura 7).





**Figura 7.** Mapa de diferencias de alturas entre modelos (en metros).

- a) modelo base frente al modelo realizado por correlación automática.
- b) modelo base frente al modelo por correlación rectificado y revisado.
- c) modelo base frente al modelo de la cartografía oficial del IGN (escala 1:25.000).

En la figura 7a se puede apreciar cómo más del 80 % de las diferencias entre el modelo manual (MODELO 1) y el modelo por correlación automática (MODELO 2) tienen errores entre -5.0 y +5.0, destacando los mayores errores en correlación con la pendiente, Heipke (1995).

En la zona AC (ámbito cerro) es donde se debe centrar el operador a la hora de llevar a cabo la necesaria supervisión y edición del modelo, el resultado será el MODELO 3 (figura 7b).

Teniendo como referencia estudios que analizan las diferencias entre DEMs, Büyüksalih (2004), y en cuyas conclusiones mencionan que la exactitud depende principalmente de la estructura de la superficie y de la pendiente del terreno. En el mapa de diferencias de alturas (figura 7c) entre el modelo base (MODELO 1) y el modelo generado a partir de la cartografía oficial (MODELO 4) se puede apreciar como también es en las zonas con mayor pendiente donde se agrupan los errores más elevados correspondiendo al ámbito cerro (AC).

El proceso de modelización depende de las características propias del área de estudio, así en zonas con mayor variabilidad del terreno (AC) es más probable el cometer errores elevados frente a las zonas llanas (ALL).

El ámbito urbano (AU) tiene un tratamiento diferente, en el modelo por correlación automática (MODELO 2) existe un alto porcentaje de puntos que han sido identificados en las cubiertas de las edificaciones y aunque son puntos correctos hay que eliminarlos a la hora de realizar el DEM ya que nos daría una superficie errónea (figura 8a). El tratamiento que se ha llevado a cabo ha sido el de eliminar todo los puntos que se han generado a partir de la correlación automática (MODELO 2) y restituir manualmente un número inferior de puntos distribuidos homogéneamente en suelo urbano, situándolos en las intersecciones de las calles. El resultado es la superficie representada en la figura 8b.



**Fig. 8.** Tratamiento de los puntos en el ámbito urbano.

Al igual que los estudios de precisión de los MDEs generados por RADARSAT y relacionando las causas de error con la pendiente y la orientación, Toutin (2002), o los trabajos de Hodgson (2005), en nuestro estudio se constata que la exactitud de los MDEs tiene una correlación lineal con la pendiente, a más pendiente mayor error.

En el estudio se ha utilizado el error estadístico conocido como “error medio cuadrático” (EMC), Li (1988), Yang and Hodler (2000). Este error se usa para describir la exactitud vertical de un MDE, comprende los “errores al azar” y los “errores sistemáticos” introducidos durante la producción de los datos.

El EMC se define como:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_t)^2}{n}} \quad (5)$$

donde:

$Z_i$  = Valor interpolado de las elevaciones del MDE del punto de prueba

$Z_t$  = Valor de elevación "verdadero" del punto de prueba

$n$  = Número de puntos de prueba

Se analizó estadísticamente el MODELO 1 que es el modelo base de referencia, se trata de 1564 puntos restituidos manualmente. Los valores estadísticos analizados de los tres ámbitos de actuación son los referidos en la tabla 4.

Destacar que el ECM más alto (3.7 m) es el que se produce comparando las diferencias de cotas entre el MODELO 1 y el MODELO 2 en el ámbito de cerro (tabla 5). Todos los índices entre estos dos modelos descienden una vez revisado y rectificado el MODELO 2, notándose menos en el ámbito llano ya que la correlación automática obtiene mejores resultados en superficies llanas.

**Tabla 4:** Valores estadísticos del modelo 1

Clase	Puntos	Media	Desv	Min	Max
URBANO	25	716.2	6.8	707.7	732.6
CERRO	610	754.8	12.7	731.0	818.2
LLANO	929	727.5	8.9	706.9	753.5

**Tabla 5:** Valor ECM con los otros modelos

Clase	Puntos	ECM valor (m)		
		Mod 1 - 2	Mod 1 - 3	Mod 1 - 4
URBANO	25	2.6	0.0	1.3
CERRO	610	3.7	3.0	3.7
LLANO	929	2.1	1.9	3.2

En la tabla 6 se muestra las coordenadas de los puntos de control tomados mediante técnicas GPS en modo diferencial con transformación al Sistema de Referencia Geodésico Local (UTM ED-50) para el control de calidad de los DEMs analizados y la z correspondiente en cada uno de ellos.

**Tabla 6:** Comparativa con técnicas GPS

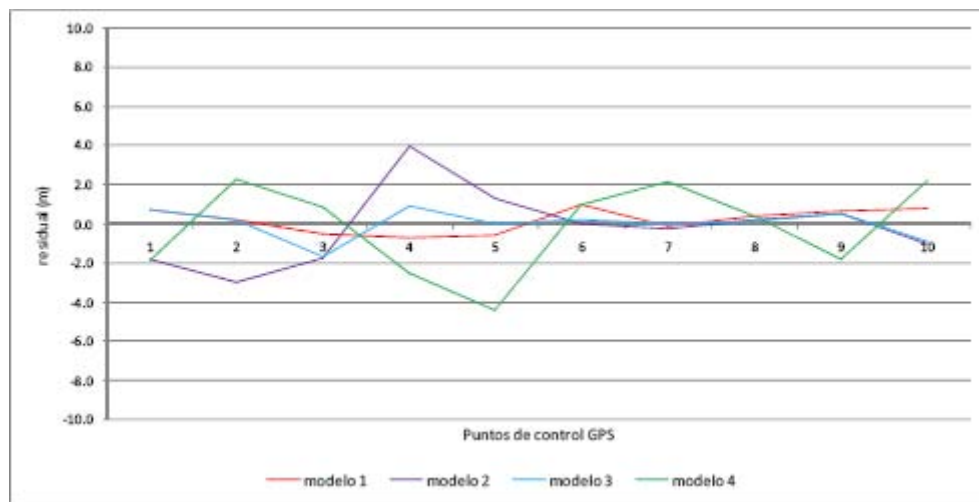
punto	x	y	GPS	Z1	Z2	Z3	Z4
1	448735.115	4367593.981	711.063	710.340	712.857	710.340	712.947
2	448034.503	4367649.044	732.749	732.553	735.689	732.553	730.487
3	447309.621	4366893.221	721.344	721.872	723.087	723.042	720.469
4	447885.405	4367015.008	817.506	818.215	813.548	816.564	820.000
5	447821.675	4367393.298	801.849	802.390	800.536	801.850	806.250
6	448703.412	4367210.714	714.987	714.023	714.989	714.743	713.995
7	447456.055	4366440.704	723.879	724.004	724.088	723.834	721.731
8	448928.208	4366740.852	715.817	715.415	715.595	715.696	715.404
9	449246.571	4366186.270	714.558	713.899	714.008	714.017	716.362
10	448028.974	4365331.289	723.184	722.389	724.233	724.071	720.988

Se utiliza nuevamente el índice ECM para analizar la calidad de los distintos DEMs analizados, obteniéndose la tabla 7. En ella se puede apreciar como los valores más cercanos a los puntos tomados como referencia (puntos GPS) son los puntos restituidos del MODELO 1 (0.6 m.)

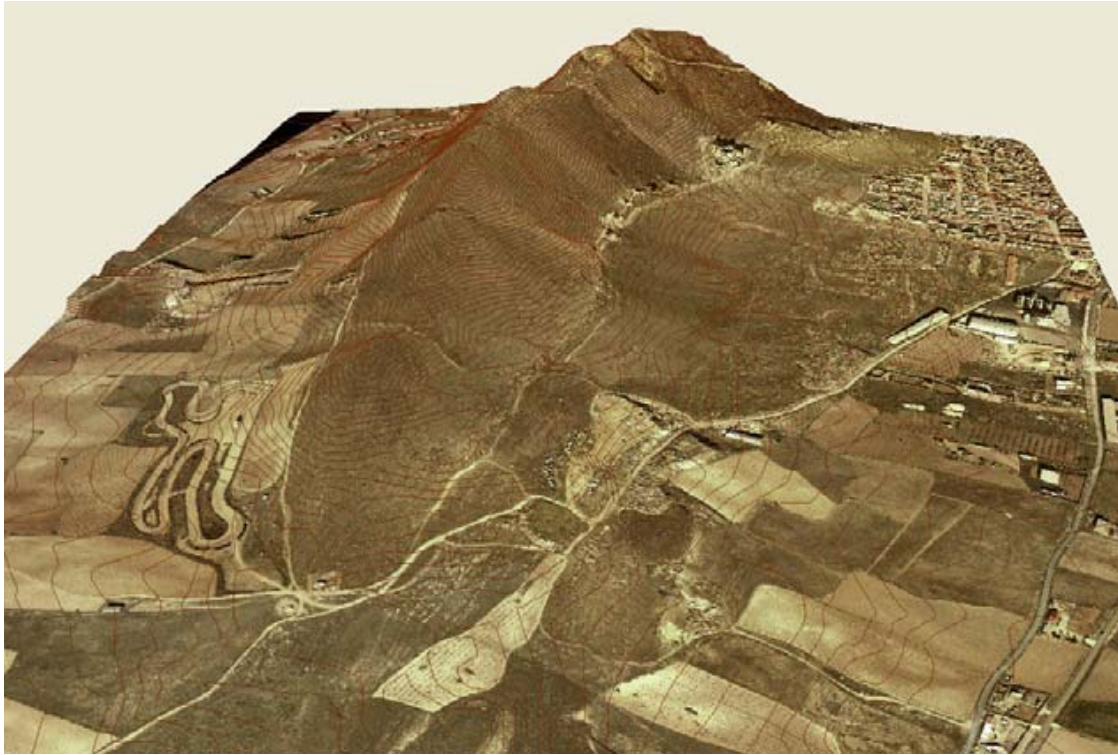
En la figura 9 se aprecia cómo la z obtenida del MODELO 1 de los puntos de control no supera 1.0 m. de error. La coordenada z de los puntos GPS sobre el MODELO 3 se encuentran en un rango de 0.0 – 1.5 m. de oscilación.

**Tabla 7.** Índice estadístico para analizar la calidad de los MDEs

Puntos	ECM valor (m)			
	Mod GPS - 1	Mod GPS - 2	Mod GPS - 3	Mod GPS - 4
10	0.6	1.8	0.7	2.2



**Figura 9:** Precisión de los resultados obtenidos



**Figura 10:** Ortofotografía digital sobre MDE de la zona de estudio.



**Figura 11.** Rehabilitación del Molino de viento 'CLAVILEÑO'

## 6. Conclusiones

- La exactitud del MDE depende de la escala del mapa fuente y de la precisión de los métodos de compilación así como de los procedimientos empleados para la vectorización de las curvas de nivel.
- Los MDEs corregidos y rectificadas presentan el mejor balance en una relación de precisión y tiempo empleado, junto a un mayor número de puntos de la trama generadora.
- Los mayores errores del MDE se han dado en las áreas con edificios.
- Se constata que la exactitud de los MDEs tiene una correlación lineal con la pendiente, a más pendiente mayor error. Relacionado con esta conclusión se encuentran los trabajos de Krupnik (2003) que analizan la calidad de las ortofotografías según la pendiente y la distancia al centro de la imagen.
- Se deduce del trabajo realizado para espacios singulares como el descrito, que la generación de MDEs, es más eficiente por visión estereoscópica directa, siempre que el operador fotogramétrico disponga de experiencia.

Las ortofotografías como la de la figura 10 junto a imágenes como la de la figura 11 presentan ciertos vínculos geométricos y topológicos que pueden ser empleados en estudios e inventarios posteriores ligados al patrimonio rural construido.

Para un estudio como el que aquí se expone podemos concluir que el número de puntos GPS empleados, son relativamente escasos pues limitan la posible extrapolación de resultados.

## References

Ackermann, F., 1984. Digital image correlation: Performance and potential application in Photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 11 (645):429-439.

Ackermann, F., 1996. Digital Photogrammetry: Challenge and Potential. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, p. 679.

Burrough, P.A. and R.A. McDonnell, 1998. *Principles of Geographic Information Systems*, Oxford University Press, New York. 333 pp.

Büyüksalih, G. et al., 2004. Accuracy analysis, dem generation and validation using russian tk-350 stereo-images. *Photogrammetric Record*, 19(107): 200-218.

Felícíximo, A.M.; Cuartero, A. and Ariza, F.J. 2004 A method for the improvement elevation data generated from automated photogrammetric methods into SIS. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, vol 35; part 4, pages 255-260

Fowler, R., 2001. Topographic Lidar, *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual* (D.F. Maune, editor), The America Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, pp. 207-236.

Gooch, M.J. and J.H. Chandler, 2001. Failure prediction in automatically generated digital elevation models, *Computers & Geosciences*, 27:913-920.

Heipke, C., 1995. State-of-the-art of digital photogrammetric workstations for topographic applications, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(1):49-56.



Heipke, C., 1999. Digital photogrammetry workstations. *GIM International* 1 (13), 81.

Hodgson, M. E.; Jensen, J.; Raber, G.; Tullis, J.; Davis, B. A.; Thompson, G., and Schuckman, K., 2005. An Evaluation of Lidar-Derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-Off Conditions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(7):817-823.

Hohle, J. K. and Potuckova, M., 2005. Automated Quality Control for OrthoImages and Dems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(1):81-87.

Hsing-Chung, C., 2004. *Validation of DEMs Derived from Radar Interferometry, Airborne Laser Scanning and Photogrammetry by Using GPS-RTK*, Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Anchorage, Alaska, 20–24 September.

Kaufmann, V., and W. Sulzer, 1997. Über die Nutzungsmöglichkeit hochauflösender amerikanischer Spionage-Satellitenbilder (1960 – 1972), *Vermessung und Geoinformation*, Heft 3/97:166 – 173.

Konecny, G., 2000. Mapping from Space, Remote Sensing for Environmental Data in Albania: A Strategy for Integrated Management, Tirana, Albania (M.F. Buchroithner, editor), NATO Science Series, Vol. 72, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 41-58.

Kraus, K. et al., (2006). Local accuracy measures for digital terrain models. *Photogrammetric Record*, 21 (116): 342-354.

Krupnik, A., 2003. Accuracy prediction for ortho-image generation, *Photogrammetric Record*, 18 (101): 41-58.

Li, Z., 1988. On the measure of digital terrain accuracy, *Photogrammetric Record*, 12 (72):873-877.

Li, Z., 1993. Theoretical models of the accuracy of digital terrain models: an evaluation and some observations. *Photogrammetric Record*, 14 (82):651-660.

Maas, H.G., 1996. Automatic DEM generation by multi-image feature based matching, *IAPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 31:484-489.

Molina, A., 1999. Flujo de trabajo en Fotogrametría Digital. *Mapping*, ISSN 1131-9100, N° 53, 1999 , pags. 53-62

Racoviteanu, A.E. et al., 2007. Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*.  
doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.036.

Saleh, R.A., 1996. Photogrammetry and the quest for digitisation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (6), 675-678.

Shan, J. and Sampath, A., 2005. Urban Dem Generation From Raw Lidar Data: a Labeling Algorithm and Its Performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(2):217-226.

Sithole, G. and Vosselman, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for base-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59(1/2):85-101.

Slama C. C., Theurer C., and Henriksen S. W., 1980. *Manual of Photogrammetry*, 4th edition ed. Falls Church, VA, USA.

Toutin, Th., 2002. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57:228-240.

Toutin, Th., 2004. Dtm Generation From Ikonos in-Track Stereo Images Using a 3d Physical Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(6):695-702.

Wolf, P.R., 1983. *Elements of Photogrammetry with Air Photo Interpretation and Remote Sensing*. McGraw-Hill, New Cork, 628 p.

Yang, X., and T. Doler, 2000. Visual and statistical comparisons of surface modelling techniques for point-based environmental data. *Cartography and Geographic Information Science*, 27 (2): 165 – 175.

### List of figures

**Figura 1.** Mapa de localización y zona de estudio.

**Figura 2:** Molinos de viento sobre el cerro ‘Calderico’ en Consuegra (Toledo, Spain)

**Figura 3:** Puntos obtenidos por restitución manual y MDE

**Figura 4:** Puntos obtenidos por correlación automática y MDE

**Figura 5.** Punto por correlación automática y rectificado

**Figura 6.** Vértice geodésico de la ROI “La Cuesta” (828.6 m.)

**Figura 7.** Mapa de diferencias de alturas entre modelos (en metros). a) modelo base frente al modelo realizado por correlación automática. b) modelo base frente al modelo por correlación rectificado y revisado. c) modelo base frente al modelo de la cartografía oficial del IGN (escala 1:25.000).

**Figura 8.** Tratamiento de los puntos en el ámbito urbano.

**Figura 9:** Precisión de los resultados obtenidos

**Figura 10:** Ortofotografía digital sobre MDE de la zona de estudio.

**Figura 11:** Rehabilitación del Molino de viento ‘Clavileño’.

### List of tables

**Tabla 1.** Métodos de identificación de imágenes

**Tabla 2:** Resultados del proceso de correlación automática

**Tabla 3:** Estructura de la BD generada

**Tabla 4:** Valores estadísticos del modelo 1

**Tabla 5:** Valor ECM con los otros modelos

**Tabla 6:** Comparativa con técnicas GPS

**Tabla 7:** Índice estadístico para analizar la calidad de los MDEs